



Le paraglaciare : évolution d'un concept

Denis Mercier

► To cite this version:

Denis Mercier. Le paraglaciare : évolution d'un concept. Presses Universitaires Blaise-Pascal. Du continent au bassin versant. Théories et pratiques en géographie physique. Hommage au Professeur Alain Godard, Presses Universitaires Blaise-Pascal, pp.592, 2007, Nature & Sociétés. hal-00281447

HAL Id: hal-00281447

<https://hal.science/hal-00281447>

Submitted on 22 May 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Du continent au bassin versant

Théories et pratiques en géographie physique

Hommage au Professeur Alain Godard

From Continent to Catchment

Theories and Practices in Physical Geography

A tribute to Professor Alain Godard

Coordinateurs de l'ouvrage

Marie-Françoise ANDRÉ, Professeur à l'Université de Clermont II

Samuel ÉTIENNE, Maître de Conférences à l'Université de Clermont II

Yannick LAGEAT, Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale

Charles LE CŒUR, Professeur à l'Université de Paris I - Panthéon-Sorbonne

Denis MERCIER, Maître de Conférences à l'Université de Nantes

Le paraglaciare, évolution d'un concept

DENIS MERCIER¹

Étymologiquement, le terme paraglaciare signifie « à côté de la glace » puisque ce mot est composé du préfixe grec *para* (à côté de) et du latin *glacies* (glace). S'il n'est consacré dans le vocabulaire géomorphologique international que dans les années 1970 (Church et Ryder, 1972), pour désigner les processus induits par la déglaciation et la période au cours de laquelle leur expression morphogénique est des plus efficaces, nombreux sont les géomorphologues, dès le XIX^e siècle, à avoir décrit ces périodes de crises sans utiliser l'expression. Certains ont même utilisé le terme paraglaciare sans lui donner réellement le sens qu'il possède actuellement. Aujourd'hui largement usité dans la communauté internationale, le concept de paraglaciare a fait l'objet d'une nouvelle définition qui élargit considérablement ses implications et permet l'émergence d'une véritable « *géomorphologie paraglaciare* ». C'est toute cette évolution sémantique du terme « *paraglaciare* » que ces quelques lignes se proposent d'explorer.

1. Le « paraglaciare » : naissance d'un concept

Le terme de paraglaciare apparaît pour la première fois dans le titre d'un article sous la plume de Ryder dans deux contributions de 1971 dans lesquels l'auteur décrit la mise en place des cônes de déjection en Colombie-Britannique (Ryder, 1971a-b). Les formes d'accumulation ayant été construites par la remobilisation de sédiments morainiques dans une séquence morphologique consécutive à la glaciation wisconsinienne, et datées par la présence de cendres volcaniques interstratifiées en provenance des Monts Mazama et St Helen, Ryder propose le terme de paraglaciare (1971a) puis de paraglaciare (1971b). L'année suivante, associée cette fois à Church, le terme de paraglaciare est formulé et explicité en tant que concept (Church et Ryder, 1972). Les deux auteurs comparent leurs travaux respectifs sur l'île de Baffin (Church, 1972), encore partiellement englacée, mais ayant connu une fonte massive lors de la disparition de la calotte wisconsinienne, avec les vallées Fraser, Bonaparte, Kamloops, Thompson et Similkameen, déglacées.

1. Géolab (UMR 6042-CNRS) et Géolittomer (UMR 6554-CNRS-LETG) ; Université de Nantes, Campus du Tertre, BP 81 227, 44312 Nantes cedex 3 (denis.mercier@univ-nantes.fr).

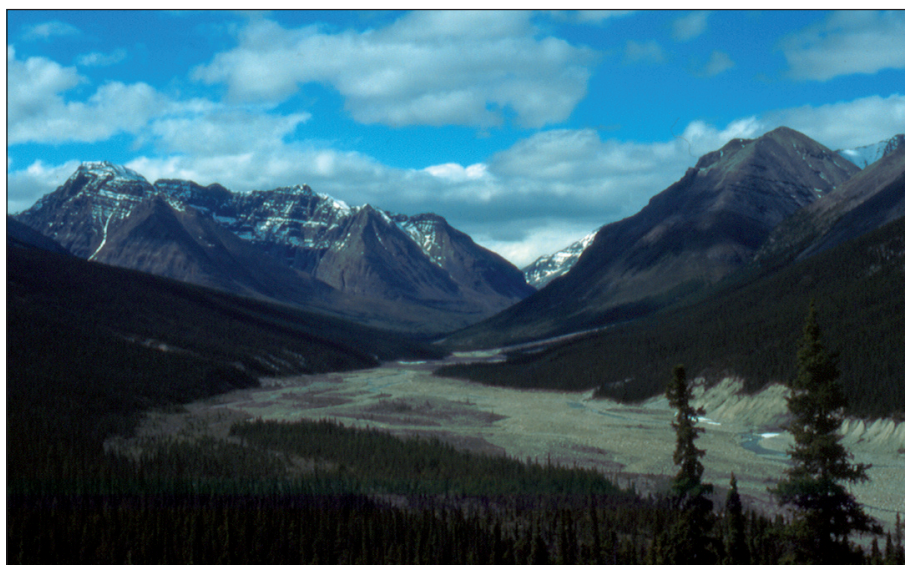


Fig. 1. Vallée déglacée depuis 10 000 BP dans les Rocheuses canadiennes en Colombie britannique, région de Toad River (cliché D. Mercier, 19 juin 2000).

cées depuis 10 000 ans en Colombie-Britannique (Ryder, 1970 ; fig. 1). L'idée générale du paraglaciaire, que conçoivent Church et Ryder, se décline en deux acceptions.

La première permet de qualifier des processus non glaciaires qui sont pourtant directement conditionnés par la glaciation. Sont désignés tous les processus proglaciaires et les processus actifs opérant autour et à l'intérieur des marges anciennement englacées, qui sont le fruit de l'ancienne présence de glace. Les processus paraglaciaires en action sont les coulées de boue (*mud-flows*), des coulées de débris (*debris flows*) et le ruissellement, responsables de la mise en place des cônes torrentiels pentus ($> 20^\circ$, *alluvial cone*), des cônes de déjection (*alluvial fan*), de la sédimentation lacustre et des plaines d'épandage fluvioglaciaires (*alluvial plain*, sandurs) dans lesquelles des terrasses peuvent ensuite être taillées par l'encaissement fluvial en fonction des variations du niveau de base.

La seconde acception désigne une « période paraglaciaire », séquence char-

nière qui suit la glaciation au cours de laquelle les processus paraglaciaires sont particulièrement opérants (fig. 2). La présence de stocks sédimentaires abondants et meubles d'origine morainique et de processus actifs permettent notamment de comprendre pourquoi les taux de dénudation sont aussi élevés au cours de ces périodes post-glaciaires, au vu des conditions climatiques qui

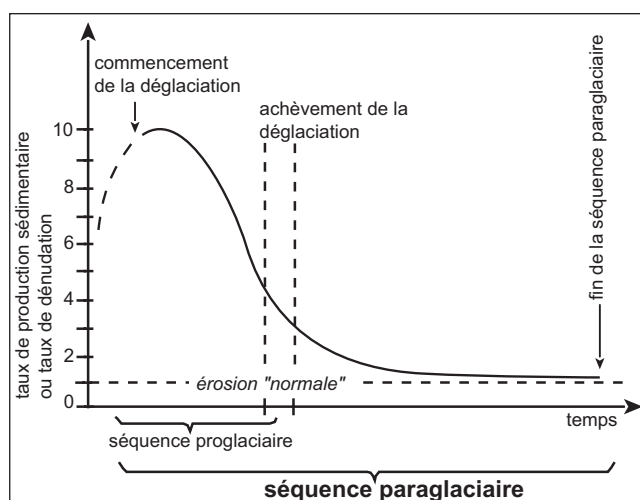


Fig. 2. La séquence paraglaciaire selon Church et Ryder (1972).

règnent alors. Cette période paraglaciale désignant dans un premier temps la déglaciation de la fin du Pléistocène a été ensuite étendue à toutes les périodes de retrait glaciaire pouvant connaître une extension temporelle au-delà de la phase restreinte de déglaciation (Church et Ryder, 1989). La séquence paraglaciale possède une durée de vie dépendante des stocks sédimentaires à remanier ; de la vitesse des processus et donc des paramètres climatiques, comme la durée de la saison de fonte, donc de la localisation géographique du bassin versant ; de la couverture végétale postglaciale ; de la taille, de la configuration orographique et de la nature géologique des bassins versants dans lesquels les processus paraglaciaux s'expriment.

Le concept de paraglaciale tel qu'il a été défini par Church et Ryder permet d'insister sur le fait que les périodes paraglaciaires représentent des séquences de réajustements des environnements, d'un état d'englacement à un autre état, avec des rythmes d'évolution rapides représentant des crises morphogéniques.

En introduisant ce concept dans le vocabulaire géomorphologique, Church et Ryder (1972) n'inventent pas de nouveaux processus et ne décrivent pas une étape inconnue dans l'évolution des milieux ayant été englacés, car bien d'autres géomorphologues l'avaient fait avant eux.

2. Le « paraglaciale » avant la naissance du concept

Deux cas de figures se rencontrent dans la littérature géomorphologique avant la naissance du concept de paraglaciale dans les années 1970. Le premier, très ancien, est une véritable description des deux acceptions du concept de paraglaciale (processus associés à la fonte et période de crise morphogénique), sans utilisation du terme paraglaciale. Le second est l'utilisation du terme paraglaciale sous une autre définition que celle actuellement usitée.

2.1. Crises « torrentielles », « diluviales », « fluvio-glaciaires », « postglaciaires »

On retrouve, chez Surell (1841), le premier Monsieur Jourdain du paraglaciale, des descriptions des dynamiques torrentielles qui animent les marges des glaciers alpins au moment où s'amorce leur décrue postérieure au Petit Âge glaciaire. Cette période, particulièrement favorable à l'expression de l'écoulement liquide sur les dépôts abandonnés sur les marges, est qualifiée « *d'ère torrentielle* ». Au cours de la même période, Martins (1867), naturaliste et grand voyageur des espaces englacés, des Alpes au Spitsberg, parle d'époque « *diluviale* » séparant deux périodes froides. Dans son étude des cônes de déjection alpins, Girardin (1910, p. 206) écrit : « *Mais nous ne serons jamais définitivement sortis de l'ère des cônes de déjections, qui sont le grand moyen mis au service de la nature pour le remblaiement et l'exhaussement des vallées, parce que nous sommes relativement tout près de la période glaciaire, et que la lave et le cône, le ravin et le torrent ne sont que des modalités du même fait nécessaire : à savoir la démolition des grands versants de la période glaciaire, dont le profil en travers tend à s'adoucir conformément aux pentes de l'eau courante* ». En cela, il met l'accent sur la notion fondamentale en géomorphologie de profil d'équilibre et se rapproche de la notion de durée de vie du paraglaciale dans la remobilisation des dépôts.

Dans les Alpes, les travaux de Brunhes (1906-1907) le conduisent à la conclusion que l'essentiel du travail de l'érosion est fait par les eaux sous-glaciaires et les torrents interglaciaires et non par le travail des glaciers. De même Kilian (1906) pense que ce sont les périodes interglaciaires, avec « *l'érosion torrentielle et fluviale* », qui sont responsables de la dissection des vallées ainsi que des paliers et surcreusements qui y sont associés. Il insiste surtout sur la rapidité des incisions « *des eaux torrentielles fluvio-glaciaires* » au moment de la décrue glaciaire des « *interstades* » ou des « *interglaciaires* » et relie les terrasses aux changements eustatiques. Rabot (1905) insiste

sur l'efficacité érosive des débâcles glaciaires et des eaux sous-glaciaires. Même chez les farouches défenseurs de l'érosion glaciaire, comme Penck et Brückner (1904-1906), les phases de déglaciation sont considérées dans l'analyse des formations fluvioglaciaires et surtout, les interglaciaires seraient capables, par le travail des eaux courantes, de rétablir le relief de maturité.

De Martonne (1910, 1911), dans sa théorie de l'évolution des formes alpines, tout en replaçant le rôle des glaciers dans le façonnement des vallées, fait une place de choix au travail des eaux courantes interglaciaires, notamment torrentielles. Il souligne la mise en place des accumulations sédimentaires, des glissements de terrain et des écroulements, pendant les périodes interglaciaires. Plus tard, dans son traité (1940, p. 560), de Martonne écrit : « *Il est d'ailleurs bien peu de grande vallée alpine qui n'ait vu de grands éboulements vers la fin de la période glaciaire quaternaire* » et, p. 574, à propos de l'explication par les changements climatiques des terrasses : « *Dans les montagnes à glaciers, le lavage des moraines a produit le même résultat que l'érosion torrentielle ailleurs, et a surchargé les cours d'eau, qui ont repris le creusement au moment de la disparition des glaciers* ». Il insiste enfin sur une relation fondamentale entre les formes d'un côté, la nature lithologique des bassins versants, leur taille, et la durée des périodes interglaciaires de l'autre. Il s'agit là aussi de mettre en exergue l'efficacité des séquences que l'on qualifierait aujourd'hui de paraglaciaires, qu'il nomme « *les épicycles fluvio-glaciaires* », par rapport aux séquences glaciaires dans l'évolution des formes du relief.

En 1963, Tricart consacre de nombreuses pages à l'analyse des milieux glaciaires et périglaciaires sans jamais utiliser le terme paraglaciaire. Cependant, le quatrième chapitre consacré à la marge glaciaire décrit toute la dynamique paraglaciaire à l'œuvre et les modelés associés. De même que le cinquième chapitre sur l'influence morphogénique des séquences glaciaires envisage la séquence de déglaciation comme une phase de grande activité morphologique. Il écrit p. 267 : « *La grande abon-*

dance des eaux libérées rapidement par la déglaciation et les grandes quantités de matériel morainique meuble disponible permettent aux rivières proglaciaires d'avoir une action intense lors de la déglaciation », puis, p. 268 : « *Lors de la déglaciation la rupture d'équilibre morphoclimatique a permis un travail accéléré des processus nouveaux, en l'occurrence les processus fluviaux* », enfin p. 269-270 : « *Ainsi, comme la phase de progression des glaciers, la phase de déglaciation est caractérisée par une grande activité morphologique. Comme elle, elle procède d'une rupture d'équilibre morphoclimatique qui entraîne une substitution de processus. Les processus nouveaux sont particulièrement intenses au moment même de la déglaciation et provoquent alors une réaction rapide des formes. Ensuite, exactement comme lors de l'englacement, leur activité décroît et se ralentit* ». Ces éléments, écrits par Tricart, correspondent tout à fait à la définition actuelle du paraglaciaire en retenant les éléments clés de crise, de vitesse d'érosion, de stocks d'eau et de sédiments, et surtout d'espérance de vie de cette dynamique. Notons que les travaux de Tricart, notamment sur les terrasses, étaient cités par le texte fondateur de Church et Ryder (1972).

On retrouve des éléments comparables dans le manuel de Viers (1967) qui écrit p. 100-101 : « *Elles [les auges] abritent aussi un riche modelé post-glaciaire dû aux séquelles de la glaciation : éboulements de décompression de versants que la glace avait décapés mais qu'elle ne soutenait plus, écroulements et ravinements de moraines en équilibre précaire sur des parois trop raides, mise en place de gigantesques cônes de déjections torrentiels alimentés par les accumulations marginales des glaciers, éboulis tardiglaciaires drapant et ensevelissant les versants* ».

Citons parmi les ouvrages spécialisés ayant décrit des processus, des formes et des périodes paraglaciaires, sans utiliser le terme, les écrits de George (1946), Pardé (1947), Bout *et al.* (1950), Guilcher (1954), Corbel (1962). Parmi les autres manuels de géomorphologie (Tricart, 1977 ; Birot, 1981 ; Coque, 1993 ; Valadas, 2004) ou de géographie physique générale (Pech et Regnaud,

1992 ; Demangeot, 2002 ; Le Cœur, 2002 ; Veyret et Vigneau, 2002 ; Lageat, 2004), pourtant tous postérieurs à l'article fondateur du concept de paraglaciare, si les processus dépendant de la fonte des glaciers du Pléistocène et les crises morphogéniques associées à la déglaciation sont analysés, l'emploi du terme paraglaciare n'apparaît pas. Il est également absent d'un ouvrage pourtant intitulé *Composantes et concepts de la géographie physique* (Derruau, 1996). Plus encore, la thèse de Vivian (1975) représente, à ce jour, l'étude la plus complète sur le paraglaciare dans les Alpes alors que l'expression n'est utilisée qu'une seule fois (p. 414) et dans un sens spatial restrictif : « *les moraines frontales correspondent à des lieux où l'accumulation – d'origine glaciaire mais surtout pro et paraglaciare – est reine* ». Il en est de même avec Francou (1993) qui utilise une seule fois (p. 139) le terme de paraglaciare sans lui donner toute sa portée. Il semblerait que le premier manuel en langue française à introduire le paraglaciare en tant que concept est celui qui a été consacré aux hydrosystèmes fluviaux (Amoros et Petts, 1993), où, dans le deuxième chapitre rédigé par Petts et Bravard, est évoqué p. 37 l'article de Church et Ryder (1972). On le retrouve ensuite logiquement dans l'ouvrage sur les cours d'eau signé par Bravard et Petit (1997, p. 99-100). Le concept paraglaciare est également présent dans des manuels français récents de sciences de la terre (Riser, 1999 ; Campy et Macaire, 2003) et dans les manuels de géographie physique générale (Godard et André, 1999 ; Mercier, 2004). Dans la première édition de leur ouvrage (Campy et Macaire, 1989), le concept de paraglaciare n'était pas intégré, mais p. 164 l'expression de « *para-moraines* » est utilisée pour désigner du matériel issu d'un glacier, mais secondairement repris par l'eau ou la gravité. Le premier article en français ayant dans son titre paraglaciare date-rait de 2000 (Mercier, 2000).

Pourquoi cette longue absence du terme paraglaciare dans la littérature française alors que le mot existait avant les articles de June M. Ryder (1971a-b) ?

2.2. Les premières utilisations du terme « paraglaciare » avant Ryder (1971)

Derruau (1958), dans la 2^e édition de son précis de géomorphologie, évoque les travaux de Surell et aborde les questions de torrentialité, sans les rapporter à la déglaciation. En revanche, il relie les morphologies proglaciaires avec l'influence des eaux de fusion des glaciers. Mais surtout, il écrit p. 156 : « *Le terme de périglaciaire est mal choisi. Nous préférierions celui de paraglaciare* ». Cette phrase n'introduit pas le concept de paraglaciare tel que nous le comprenons actuellement. La critique porte sur le terme périglaciaire, qui étymologiquement, recouvre mal les espaces à la surface du globe affectés par les dynamiques de gel-dégel des sols et des roches, nombres d'environnements périglaciaires ne se trouvant pas à proximité d'un glacier. Cependant, à aucun moment Derruau n'explicite le terme de paraglaciare.

Plus proches de l'actuelle utilisation du concept, sont les écrits de Godard (1965) dans son œuvre magistrale sur la géomorphologie de l'Écosse du Nord-Ouest. À plusieurs reprises dans son approche régionale, Godard consacre des analyses au travail géomorphologique des eaux de fonte des glaciers, en distinguant les formes d'accumulation fluvio-glaciaires des formes de creusement. Il écrit même p. 158 à propos d'une gorge : « *Il faut donc admettre que le creusement est l'œuvre d'un torrent paraglaciare et qu'il s'est effectué à un moment où le Strath Kanaird était encore partiellement occupé par la glace. Le torrent suivait la limite de la glace et rejoignait la vallée principale à un endroit où précisément nous trouvons quelques accumulations morainiques et le début d'une nappe fluvioglaciaire* », puis p. 321 : « *Sculptées par les torrents pro-glaciaires, para-glaciaires ou sous-glaciaires, elles [les gorges] datent suivant les cas du stade des glaciers locaux ou des stades de retrait des grands glaciers de vallée* ». Son étude porte également sur les formes de décohé- sion paraglaciare et on lit p. 629 : « *La décompression consécutive au départ de la glace a provoqué le long de quelques parois d'auge des éboulements de bancs rocheux que*

délimitent de grandes diaclases disposées parallèlement au versant ». Ces remarques sur l'évolution des parois écossaises ont été également formulées par l'auteur pour les versants du Labrador quelques années plus tard (Godard, 1979).

Outre l'analyse des formes paraglaciales, Godard montre bien l'importance de cette transition dans l'histoire des paysages écossais puisqu'il écrit p. 628 : « *Il n'est pas déraisonnable d'admettre que le long des côtes, comme à l'intérieur des terres, la phase contemporaine de la déglaciation ou immédiatement postérieure a été une période de crise morphologique* » et d'insister sur la rapidité et l'efficacité de ces crises lorsqu'il écrit p. 163 : « *Il est clair que le changement rapide du niveau marin lié au soulèvement isostatique de la fin de la période glaciaire a provoqué un intense creusement des vallées dans leur partie inférieure. Ces gorges qui entaillent parfois la roche en place ont été réalisées en un temps record, grâce à la position très favorable du niveau de base mais aussi grâce à l'abondance du ruissellement sous climat froid qui a permis d'ailleurs le creusement de nombreux ravins maintenant morts* ».

S'il utilise dès 1965, à de très nombreuses reprises, le terme « paraglaciale », avec ou sans trait d'union, Godard n'en introduit pas le concept qui aujourd'hui fait débat. Il n'en a pas moins analysé les formes et la temporalité qui fait de ce concept toute sa valeur. Ses travaux ultérieurs sur les vitesses d'érosion, les rythmes, les relais de processus dans les milieux froids des hautes latitudes, ne font jamais mention du terme paraglaciale alors qu'il aurait pu y tenir le devant de la scène, comme si l'expression utilisée dès 1965 avait disparu de son vocabulaire. La seule exception date de 1990, lorsque, relatant les travaux de Clark (1988), Godard utilise l'expression de « *domaines paraglaciales* » (Godard, 1990, p. 170). Il faudra ensuite attendre le manuel sur les milieux polaires (Godard et André, 1999) pour que le terme de paraglaciale retrouve une place de choix.

Ainsi, Alain Godard, un des pionniers dans l'utilisation du mot paraglaciale, aurait pu être le premier à définir le concept.

3. L'extension récente du concept, ou la naissance d'une « géomorphologie paraglaciale »

Au même titre qu'il existe une géomorphologie glaciaire, périglaciaire, littorale, émerge dans la littérature internationale une véritable géomorphologie paraglaciale. Reprenant les termes de Church et Ryder (1972), Ballantyne (2002) propose une nouvelle définition au concept de paraglaciale qui, selon lui, doit désigner maintenant « *les processus non glaciaires à la surface de la terre, les accumulations sédimentaires, formes, systèmes et paysages qui sont directement conditionnés par les glaciations et les déglaciations* » (fig. 3). Cette nouvelle définition est l'occasion de cerner les champs d'extension spatio-temporels de ce concept et de définir un « *géosystème paraglaciale* » (Ballantyne, 2003a).

3.1. La production primaire des sédiments paraglaciales

Une des premières conséquences de la déglaciation est la mise à nu des parois jusqu'alors englacées. La disparition de cette masse de glace entraîne alors de grands glissements, écroulements ou éboulements massifs, au caractère catastrophique, pouvant être générateur de risques, parfois mortels, mais également peut initier des déformations progressives et lentes des formations de versant, ou bien encore des ajustements périodiques des versants par chutes ou glissements de petites tailles (fig. 4).

La décohésion, ou décompression, ou « *desserrage* » (Vivian, 1975), dépend essentiellement de la tension exercée par la glace et de la nature de l'encaissant (notamment des discontinuités et de la lithologie) susceptible de réponse élastique. Non envisagée au départ par Church et Ryder (1972), cette dynamique a été identifiée comme paraglaciale dès 1977 par Wyrwoll. Cette dynamique paraglaciale peut s'exercer des millénaires après la déglaciation comme l'atteste l'apport des nouvelles techniques de datation cosmonu-

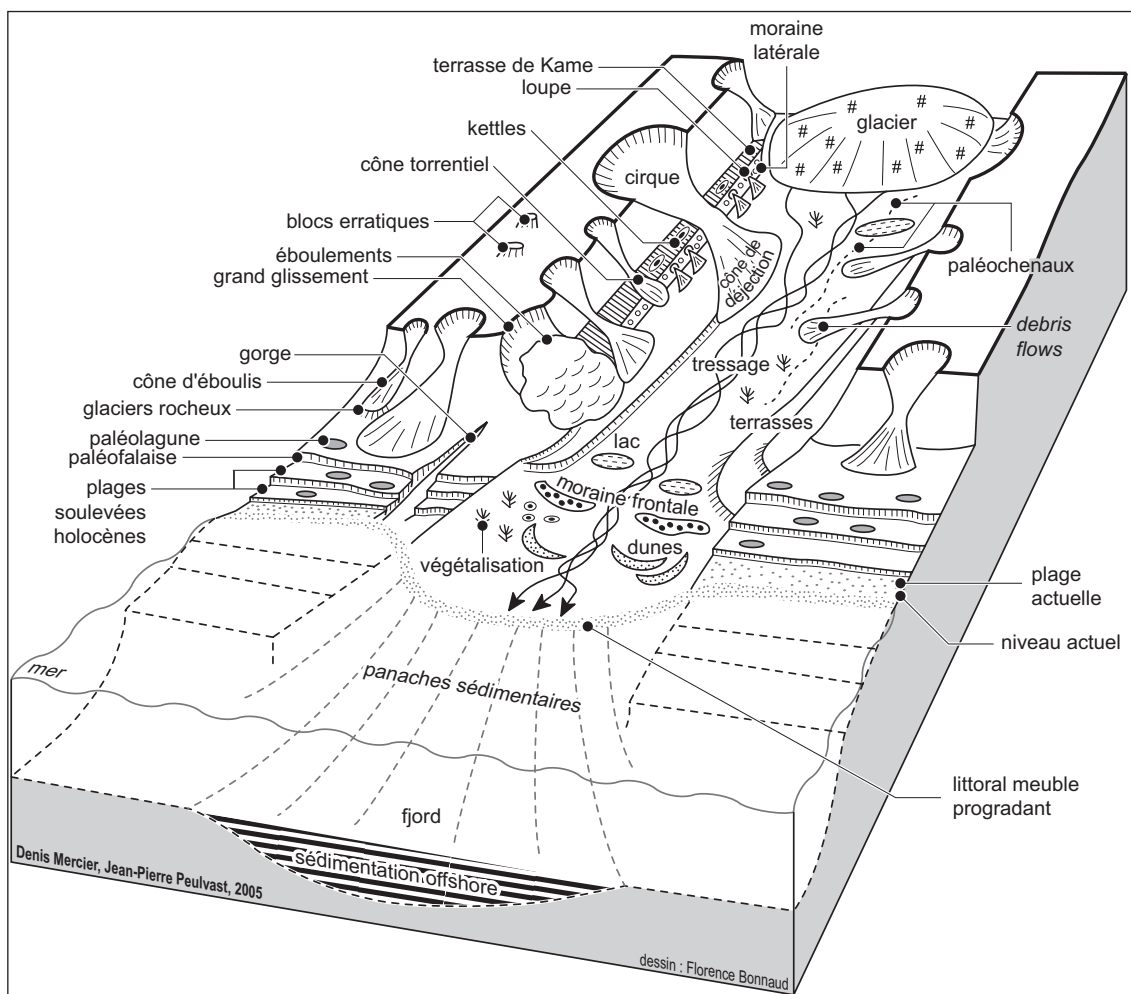


Fig. 3. Formes et processus paraglaciers (© D. Mercier, inédit).

cléides (Ballantyne *et al.*, 1998). La décohésion paraglacière est responsable d'accumulations sédimentaires de pieds de versants dont les volumes considérables peuvent désormais s'expliquer par la rapidité des apports par rapport aux taux de production assez faibles des processus périglaciaires comme la gélifraction (André, 1997). L'importance volumique des dépôts paraglaciers mis en place après chaque glaciation permet également de comprendre le volume considérable des moraines lors des périodes froides ultérieures et des avancées glaciaires consécutives (Ballantyne, 2002). Plus encore, le poids de la

décohésion paraglacière permettrait d'expliquer l'évolution des cirques glaciaires et des vallées en auge, pour lesquelles les séquences paraglacières auraient autant d'importance que les séquences glaciaires (Augustinus, 1995).

3.2. L'ajustement paraglacière des dépôts de pente

Le retrait des glaciers laisse aux pieds des versants des moraines latérales (fig. 5). Ces dépôts sont rapidement remaniés par des glissements et coulées de débris activées par le ruissellement

de fonte de la glace morte au sein du dépôt. Ces manifestations géomorphologiques paraglaciaires s'achèvent rapidement après la disparition de la glace morte en quelques décennies (Curry, 1999 ; Mercier, 2001a). De nombreuses recherches sédimentologiques discriminantes ont été menées, notamment dans les îles britanniques et dans les montagnes du Karakorum, afin de distinguer dans la stratigraphie quaternaire, les faciès des dépôts glaciaires, paraglaciaires et périglaciaires (Ballantyne, 2002). L'approche quantitative des volumes paraglaciaires accumulés est facilitée par l'utilisation de la sismique réfraction couplée à l'analyse cartographique classique (Schrott *et al.*, 2003).

3.3. Les modifications paraglaciaires des marges glaciaires

Les surfaces planes délaissées par les glaciers lors de leur retrait connaissent des dynamiques qui peuvent être qualifiées de modifications paraglaciaires. Il s'agit des mouvements de masse associés à la fonte de la glace morte, comme les processus thermokarstiques générateurs de volumes considérables de sédiments (Etzelmüller, 2000) ou tout simplement de l'édification des kettles (Bodéré, 1977). Par ailleurs, les processus fluviaux et les processus éoliens remobili-



Fig. 4. Glissement de terrain paraglaciaire sur un versant d'auge glaciaire en Norvège septentrionale, région de Tromsø (cliché D. Mercier, 4 juillet 2004).



Fig. 5. Dynamique paraglaciaire à l'œuvre au Spitsberg, remaniement des moraines par fonte de la glace morte au Conwaybreen (le personnage donne l'échelle (cliché D. Mercier, 19 juillet 2004).

sent les dépôts morainiques avec des taux d'autant plus importants que les sédiments viennent d'être abandonnés dans les premiers temps de l'évolution paraglaciale (Benn et Evans, 1998). Les marges déglacées sont également le lieu de colonisation végétale primaire en compétition avec les dynamiques paraglaciaires (Matthews, 1992 ; Laffly et Mercier, 2002 ; Moreau *et al.*, 2004).

3.4. Les transferts sédimentaires des versants au niveau de base

Les cônes de déjection et les remblaiements de fonds de vallée constituent les principales formes d'accumulation paraglaciaires et représentent les premières formes interprétées comme telles par Ryder (1971a-b). Les coulées de débris et les rivières remobilisent les dépôts glaciaires pour construire ces accumulations dont les plus importantes en taille se retrouvent dans la vallée de la Hunza dans les montagnes du Karakorum (Peulvast, 2004 ; fig. 6). Pour les remblaiements de vallée, les faciès associent des dépôts morainiques, fluvio-glaciaires, lacustres et paraglaciaires. Ces accumulations sédimentaires paraglaciaires seront

ensuite remobilisées par les dynamiques fluviales qui trouvent dans ces dépôts des stocks importants, ce qui accroît les taux de transport solide (Church et Slaymaker, 1989). De ce fait, la durée de vie du paraglaciale est prolongée pour plusieurs siècles ou millénaires en fonction notamment de la taille des bassins versants considérés (Church et Ryder, 1972 ; Ballantyne, 2003b ; Cossart, 2004). En revanche, même si l'évolution paraglaciale demeure active depuis la déglaciation dans certaines parties de l'Himalaya, la durée de vie de cette séquence paraglaciale sera écourtée plus rapidement que dans d'autres milieux de hautes montagnes, à cause de la violence de la mousson qui accélère la dilapidation des stocks sédimentaires (Barnard *et al.*, 2004). Une partie de ses transports sédimentaires sont interceptés par des dépressions lacustres avant même d'arriver au niveau de base. L'analyse des dépôts lacustres permet de calculer des taux de sédimentation et des changements de faciès qui sont largement influencés par les apports paraglaciaires massifs au moment du retrait glaciaire et déclinant par la suite (Mercier 2001b, Ballantyne, 2002 ; Slaymaker *et al.*, 2003). Ces dépôts lacustres constituent souvent

eux-mêmes une source potentielle pour la recharge des transports solides dans les bassins versants longtemps après la déglaciation et prolongent l'activité paraglaciale de transfert de sédiments sur toute la durée de l'Holocène.

En fin de course, toutes ces dynamiques paraglaciaires s'achèvent sur



Fig. 6. Cône paraglaciale au débouché d'une gorge dans la vallée de la Hunza, Karakorum, Pakistan (cliché J.-P. Peulvast, juin 1992).

les littoraux et dans la sédimentation *offshore*. Les côtes affectées directement par la sédimentation continentale paraglaciale sont qualifiées de « côtes paraglaciaires » dans une synthèse remarquable (Forbes et Syvitski, 1994). Les rebonds glacio-isostatiques et les manifestations glacio-eustatiques ne sont pas considérés comme des processus paraglaciaires. En revanche, ils ont une influence directe sur les processus paraglaciaires comme l'incision des vallées et les dépôts deltaïques. Les fjords, avec leur surcreusement, représentent l'essentiel des zones de stockage sédimentaire paraglaciale holocène. Dans les secteurs émergés, ce sont les littoraux accolés aux sandurs qui représentent les principales zones d'accumulations sédimentaires paraglaciaires avec une tendance lourde à la progradation sur leurs marges, en corrélation avec les transferts sédimentaires continentaux et les mobilités des réseaux hydrographiques (Mercier et Laffly, 2005). La sédimentation *offshore* consécutive à la déglaciation des inlandis pléistocènes ont engendré des événements de Heinrich, qui ont largement perturbé le climat notamment européen, et sont l'illustration de la dynamique paraglaciale à l'échelle de tout l'Atlantique Nord (Dowdeswell et Cofaigh, 2002 ; Mercier, 2005).

Les transferts sédimentaires paraglaciaires s'effectuent donc avec de nombreux relais dans l'espace et dans le temps.

Conclusion

Faut-il encore admettre que le terme de paraglaciale n'aurait été introduit dans la littérature scientifique qu'en 1971 par Ryder alors qu'il était utilisé avant ? S'il est vrai que le terme de paraglaciale n'accède qu'au rang de concept qu'en 1972 (Church et Ryder, 1972), il faut encore attendre la fin des années 1980, et surtout les années 1990, pour que le concept de paraglaciale soit véritablement utilisé dans la littérature géomorphologique internationale.

Les formes du relief, les dépôts et les processus des milieux froids ont toujours été expliqués par l'action des processus glaciaires et périglaciaires. Le temps est venu d'une explication globale passant par une lecture des formes et des flux sédimentaires à l'aune du concept intégrateur de paraglaciale. Aux côtés d'une géomorphologie glaciaire et d'une géomorphologie périglaciaire, il y a place pour une géomorphologie paraglaciale. D'autant que de nombreux éléments concourent pour une relecture de l'évolution des milieux froids, notamment par la réévaluation du poids des processus périglaciaires (André, 2003 ; Étienne, 2004 ; Étienne et André, 2003 ; Mercier, 2002, 2003).

Si l'on considère les espaces englacés au cours des périodes froides du Pléistocène, et leurs périphéries affectées par les dynamiques proglaciaires, ce ne sont pas moins de 40 % des terres émergées qui ont enregistré les changements climatiques que l'on peut qualifier de paraglaciaires et il faut ajouter les espaces de sédimentation *offshore*. En gardant à l'esprit que les périodes froides du Pléistocène ont connu de très nombreuses alternances, le problème temporel revient au cœur du débat. En effet, les crises paraglaciaires, avec des vitesses d'érosion plus importantes que pendant les phases froides, permettent de comprendre pourquoi les taux d'érosion Pléistocène proposés sont si élevés et que les formes du relief et les modelés attribués au froid soient aussi frais. L'identification des dépôts paraglaciaires représente une avancée considérable pour les reconstitutions paléoenvironnementales quaternaires.

Même si des critiques existent (Slaymaker et Owens, 2004), le concept de paraglaciale apporte incontestablement une clé de lecture de l'évolution des paysages applicable à toutes les zones ayant connu directement ou indirectement des phases de glaciation-déglaciation. À l'heure d'une réflexion sur l'impact des changements climatiques sur les environnements, le concept de paraglaciale ouvre des perspectives et renouvelle les approches géomorphologiques classiques en mettant l'accent sur les stocks sédimentaires, les

flux, les bilans, les rythmes et les crises. La naissance d'une « *géomorphologie paraglaciale* » (Ballantyne, 2002) devrait, en toute bonne logique, rapidement s'imposer.

Références

- AMOROS C., PETTS G.E. (dir.), 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*, Paris, Masson : 300 p.
- ANDRÉ M.-F., 1997. Holocene rockwall retreat in Svalbard: a triple-rate evolution, *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 : 423-440.
- ANDRÉ M.-F., 2003. Do periglacial areas evolve under periglacial conditions?, *Geomorphology*, 52 : 149-164.
- AUGUSTINUS P.C., 1995. Glacial valley cross-profile development: the influence of in situ rock stress and rock mass strength, with examples from the Southern Alps, New Zealand, *Geomorphology*, 14 : 87-97.
- BALLANTYNE C.K., 2002. Paraglacial geomorphology, *Quaternary Science Reviews*, 21 : 1 935-2 017.
- BALLANTYNE C.K., 2003a. Paraglacial landsystems, in EVANS D.J. (ed.), *Glacial landsystems*, London, E. Arnold : 432-461.
- BALLANTYNE C.K., 2003b. Paraglacial landform succession and sediment storage in deglaciated mountain valleys: theory and approaches to calibration, *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supp. 32 : 1-18.
- BALLANTYNE C.K., STONE J.O., FIFIELD L.K., 1998. Cosmogenic Cl-36 dating of postglacial landsliding at The Storr, Isle of Skye, Scotland, *The Holocene*, 8 : 347-351.
- BARNARD P.L., OWEN L.A., SHARMA M.C., FINKEL R.C., 2004. Late Quaternary (Holocene) landscape evolution of a monsoon-influenced high Himalayan valley, Gori Ganga, Nanda Devi, NE Garhwal, *Geomorphology*, 61 : 91-110.
- BENN D.I., EVANS D.J.A., 1998. *Glaciers et Glaciation*, London, Arnold : 734 p.
- BODÉRÉ J.-C., 1977. Les kettles du sud-est de l'Islande, *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 3 : 259-270.
- BOUT P., CORBEL J., DERRUAU M., GARAVEL L., PÉGUY C.-P., 1955. Géomorphologie et glaciologie en Islande centrale, *Norvège*, 8 : 461-574.
- BIROT P., 1981. *Les processus d'érosion à la surface des continents*, Paris, Masson : 605 p.
- BRAVARD J.-P., PETIT F., 1997. *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*, Paris, Armand Colin : 222 p.
- BRUNHES J., 1906-1907. Érosion fluviale et érosion glaciaire. Observations de morphologie comparée, *Revue de Géographie annuelle*, 1 : 281-308.
- CAMPY M., MACAIRE J.-J., 1989. *Géologie des formations superficielles. Géodynamique, faciès, utilisation*, Paris, Masson : 433 p.
- CAMPY M., MACAIRE J.-J., 2003. *Géologie de la surface. Érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*, Paris, Dunod : 440 p.
- CHURCH M., 1972. Baffin Island sandurs, *Canada Geological Survey Bulletin*, 216 : 205 p.
- CHURCH M., RYDER J.M., 1972. Paraglacial sedimentation : consideration of fluvial processes conditioned by glaciation, *Geological Society of America Bulletin*, 83 : 3 059-3 072.
- CHURCH M., RYDER J.M., 1989. Sedimentology and clast fabric of subaerial debris flow facies in a glacially influenced alluvial fan –a discussion, *Sedimentary Geology*, 65 : 195-196.
- CHURCH M., SLAYMAKER O., 1989. Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia, *Nature*, 337 : 452-454.
- CLARCK M.J., 1988. *Advances in periglacial geomorphology*, London, John Wiley : 481 p.
- COQUE R., 1993 (5^e éd.). *Géomorphologie*, Paris, Armand Colin : 503 p.
- CORBEL J., 1962. *Neiges et glaciers*, Paris, Armand Colin : 224 p.
- COSSART E., 2004. L'activité torrentielle dans un haut bassin versant alpin en cours de déglaciation durant le xx^e siècle : le vallon de Celse-Nière (Massif des Écrins, France), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3 : 225-240.
- CURRY A.M., 1999. Paraglacial modification of slope form, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24 : 1 213-1 228.
- DEMANGEOT J., 2002 (9^e éd.). *Les milieux « naturels » du globe*, Paris, Armand Colin : 364 p.
- DERRUAU M., 1958 (2^e éd.). *Précis de géomorphologie*, Paris, Masson : 395 p.
- DERRUAU M. (dir.), 1996. *Composantes et concepts de la géographie physique*, Paris, Armand Colin : 256 p.
- DOWDESWELL J.A., COFAIGH C.O. (eds), 2002. *Glacier-influenced sedimentation on high-latitude*, London, Geological Society, Special Publications, n° 203 : 392 p.
- ÉTIENNE S., ANDRÉ M.-F., 2003. Variabilité de la hiérarchie des processus de météorisation à travers les bilans météoriques de divers milieux périglaciaires nord-atlantiques (Islande, Labrador, Laponie, Spitzberg), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3 : 177-190.
- ÉTIENNE S., 2004. *Islande. Biogéomorphologie d'un milieu périglaciaire humide*, Clermont-Ferrand, Sèteun : 257 p.
- ETZELMÜLLER B., 2000. Quantification of thermo-erosion in pro-glacial areas –examples from Svalbard, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 3 : 343-361.

- FORBES D.L., SYVITSKI J.P.M., 1994. Paraglacial coasts, in CARTER R.W.G., WOODROFFE C.D. (eds), *Coastal evolution. Late quaternary shoreline morphodynamics*, Cambridge University Press : 373-424.
- FRANCOU B., 1993. *Hautes montagnes - Passion d'explorations*, Paris, Masson : 202 p.
- GEORGE P., 1946. *Les régions polaires*, Paris, Armand Colin : 207 p.
- GIRARDIN P., 1910. Études de cônes de déjections, *Annales de Géographie*, 105 : 193-207.
- GODARD A., 1965. *Recherches en géomorphologie en Écosse du Nord-Ouest*, thèse d'État, Université de Paris Sorbonne ; Strasbourg, Les Belles Lettres : 701 p.
- GODARD A., 1979. Reconnaissance dans l'extrémité nord du Labrador et du Nouveau Québec, contribution à l'étude géomorphologique des socles en milieux froids, *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 4 : 125-142.
- GODARD A., 1990. L'Arctique, milieu figé ou milieu d'évolution rapide ? (quelques réflexions à propos de la dynamique géomorphologique dans les hautes latitudes), *Pour Jean Malaurie*, Paris, Plon : 157-175.
- GODARD A., ANDRÉ M.-F., 1999. *Les milieux polaires*, Paris, Armand Colin : 451 p.
- GUILCHER A., 1954. *Morphologie littorale et sous-marine*, Paris, PUF : 216 p.
- KILIAN W., 1906. L'érosion glaciaire et la formation des terrasses, *La Géographie*, XIV : 261-274.
- LAFFLY D., MERCIER D., 2002. Global change and paraglacial morphodynamic modification in Svalbard, *International Journal of Remote Sensing*, 43, 21 : 4 743-4 760.
- LAGEAT Y., 2004. *Les milieux physiques continentaux*, Paris, Belin : 191 p.
- LE CŒUR C. (coord.), 2002 (2^e éd.). *Éléments de géographie physique*, Paris, Bréal : 448 p.
- MARTINS C., 1867. *Les glaciers actuels et leur ancienne extension pendant la période glaciaire*, Paris, Impr. J. Claye : 94 p.
- MARTONNE (E. de), 1910 et 1911. L'érosion glaciaire et la formation des vallées alpines, *Annales de géographie*. XIX : 289-317 et XX : 1-29.
- MARTONNE (E. de), 1940 (6^e éd.). *Traité de géographie physique, Tome second : le relief du sol*, Paris, Armand Colin : 499-1 057.
- MATTHEWS J.A., 1992. *The ecology of recently deglaciated terrain: a geo-ecological approach to glacier forelands and primary succession*, Cambridge University Press : 386 p.
- MERCIER D., 2000. Du glaciaire au paraglaciaire : la métamorphose des paysages polaires au Svalbard, *Annales de Géographie*, 616 : 580-596.
- MERCIER D., 2001a. *Le ruissellement au Spitsberg. Le monde polaire face aux changements climatiques*. Presses Universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 278 p.
- MERCIER D., 2001b. Les piémonts des hautes latitudes : rythmes et crises morphogéniques, *Sud-Ouest Européen*, 10 : 3-21.
- MERCIER D., 2002. La dynamique paraglaciaire des versants du Svalbard, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 46, 2 : 203-222.
- MERCIER D., 2003. Glaciaire, paraglaciaire, périglaciaire : relais et combinaisons de processus, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 4 : 349-354.
- MERCIER D. (dir.), 2004. *Le commentaire de paysages en géographie physique. Documents et méthodes*, Paris, Armand Colin : 256 p.
- MERCIER D., 2005. Changements climatiques et métamorphoses des paysages polaires, in ANDRÉ M.-F. (dir.), *Le monde polaire : mutations et transitions*, Paris, Ellipses : 25-38.
- MERCIER D., LAFFLY D., 2005. Actual paraglacial progradation of the coastal zone in the Kongsfjorden area, West Spitsbergen (Svalbard), in HARRIS C., MURTON J. (eds), *Cryospheric Systems: Glaciers and Permafrost*, Special publication n°242, Geological Society, London : 111-117.
- MOREAU M., MERCIER D., LAFFLY D., 2004. Un siècle de dynamiques paraglaciaires et végétales sur les marges du Midre Lovénbreen, Spitsberg nord-occidental, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2 : 157-168.
- PARDÉ M., 1947. *Fleuves et rivières*, Paris, Armand Colin : 224 p.
- PECH P., REGNAULD H., 1992. *Géographie physique*, Paris, PUF : 433 p.
- PENCK A., BRÜCKNER E., 1904-1905-1906. *Die Alpen im Eiszeitalter*. Tauchnitz ed., Leipzig, 3 vol. : 1 200 p.
- PEULVAST J.-P., 2004. Les paysages de la haute montagne : le Karakorum (Pakistan). in MERCIER D. (dir.), *Le commentaire de paysages en géographie physique*, Paris, Armand Colin : 32-35.
- RABOT C., 1905. Les débâcles glaciaires, *Bulletin de géographie historique et descriptif*, 3 : 413-465.
- RISER J. (dir.), 1999. *Le Quaternaire, Géologie et milieux naturels*, Paris, Dunod : 320 p.
- RYDER J.M., 1970. *Alluvial fans of post-glacial environments within British Columbia*, Ph.D. Thesis, Vancouver, University of British Columbia : 416 p.
- RYDER J.M., 1971a. The stratigraphy and morphology of para-glacial alluvial fans in south-central British Columbia, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 : 279-298.
- RYDER J.M., 1971b. Some aspects of the morphometry of paraglacial alluvial fans in south-central British Columbia, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 : 1 252-1 264.
- SCHROTT L., HUFSCHMIDT G., HANKAMMER M., HOFFMANN T., DIKAU R., 2003. Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill depo-

- sits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany, *Geomorphology*, 55 : 45-63.
- SLAYMAKER O., SOUCH C., MENOUNOS B., FILIPPELLI G., 2003. Advances in Holocene mountain geomorphology inspired by sediment budget methodology, *Geomorphology*, 55 : 305-316.
- SLAYMAKER O., OWENS P.N., 2004. Mountain geomorphology and global environmental change, in OWENS P.N., SLAYMAKER O. (eds), *Mountain geomorphology*, London, Arnold : 277-300.
- SURELL A., 1841. *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*. Carillan-Goeuvry éditeurs, Paris, 283 p. (rééd. en 2 t. chez Dunod, 1870 : 321 p., 1872 : 386 p.)
- TRICART J., 1963. *Géomorphologie des régions froides*, Paris, PUF : 289 p.
- TRICART J., 1977. *Précis de géomorphologie*, t. 2 : *géomorphologie dynamique générale*, Paris, Sedes : 345 p.
- VALADAS B., 2004. *Géomorphologie dynamique*, Paris, Armand Colin : 192 p.
- VEYRET Y., VIGNEAU J.-P. (dir.), 2002. *Géographie physique. Milieux et environnement dans le système terre*, Paris, Armand Colin : 368 p.
- VIERIS G., 1967. *Éléments de géomorphologie*, Paris, Fernand Nathan : 208 p.
- VIVIAN R., 1975. *Les glaciers des Alpes occidentales, étude géographique*, thèse d'État, Université de Grenoble ; Grenoble, Impr. Allier : 513 p.
- WYRWOLL K.H., 1977. Causes of rock-slope failure in a cold area: Labrador-Ungava, *Geological Society of America Reviews in Engineering geology*, 3 : 59-67.